

С 717710-1

На правах рукописи

ЩЕГЛОВ МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ

**ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ РАСТРА
С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ
МНОГОФАЗНОГО КАНАЛА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ**

**Специальность 05.13.05 - Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2000

Работа выполнена на кафедре автоматики и управления Казанского Государственного технического университета им. А.Н. Туполева - КАИ

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент

Маханько А.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

В.М. Солдаткин

кандидат технических наук

Р.П. Николаев

Ведущая организация: Государственное унитарное предприятие Научно-производственное объединение Государственный институт прикладной оптики - ГУП НПО ГИПО (г.Казань).

Защита диссертации состоится. 4 07 2000г. в 15 часов на заседании диссертационного совета К063.43.05 в Казанском Государственном техническом университете им. А.Н. Туполева по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса 10.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке университета (420111, г. Казань, ул. К. Маркса 10).

Автореферат разослан 7 06 2000г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
КФУ



0000947713

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

В. А. Козлов

Актуальность темы.

Ряд перспективных прецизионных систем управления (например, системы управления некоторых роботов, станков с ЧПУ, станков для производства точных оптических деталей и т.п.) имеют важную отличительную особенность: рабочие перемещения их исполнительных органов совершаются с очень малой скоростью. Все большее распространение получают и системы с безредукторными приводами, например, на основе пьезодвигателя, моментных двигателей. Актуальными являются также фундаментальные и прикладные исследования механических свойств больших упругих конструкций и других медленно перемещающихся объектов. Поэтому, при создании таких систем и проведении исследований, необходимы датчики скорости и величины перемещений, надежно и точно работающие на малых скоростях (линейные перемещения - порядка 10^{-3} м/с и до 10^{-7} м/с и угловые - порядка 10^{-2} рад/с и до 10^{-6} рад/с), способные фиксировать измеряемые параметры в переходных режимах (0.1..10 отсчетов/с по скорости и 1..100 отсчетов/с по перемещению). Стремление повысить их точность приводит к возникновению взаимоисключающих требований по чувствительности (разрешающей способности, точности) и быстродействию (времени измерения), а также жестких требований к допустимой аддитивной составляющей погрешности.

Наиболее перспективными в этой области считаются по физическому принципу действия входного преобразователя - фотоэлектрические (оптико-электронные) с использованием оптических растров, в частности, дифракционных решеток, а по виду выходного сигнала - цифровые, фазовые (с промежуточным преобразованием перемещения в фазу электрического сигнала). Преобразователи фазового типа получили наибольшее распространение в нашей стране, им посвящены работы Л.Н. Преснухина, В.А. Соломатина, В.А. Шилина, А.А. Ахметжанова, Ю.С. Смирнова, В.Г. Смирнова, М.А. Габуллина, В.Р. Матвеевского, А.В. Косинского, Э.Н. Асиновского, А.Е. Зверева, В.Г. Домрачева, и многих других. Важным достоинством фазового метода также является простота получения сигнала и по величине и по скорости перемещений и практически не ограниченный диапазон перемещений.

Для обеспечения существенного повышения точности и чувствительности при малых скоростях перемещений наиболее эффективными считаются дифференциальный метод и метод измерения с переменной структурой преобразователя. При этом часто отмечается, что наибольшим резервом по улучшению точностных показателей обладают электронные средства формирования и обработки сигналов датчика (первичного преобразователя). Это определяется, во-первых, стремительным ростом возможностей современной электроники, а во-вторых, наличием элементной базы для построения преобразователей па-

раметров перемещений, по точности значительно превосходящих существующие измерительные устройства для этих целей.

Однако, несмотря на отмечаемую актуальность проблемы измерения параметров медленных перемещений, в имеющейся литературе недостаточно представлены теория, расчет, алгоритмы обработки сигналов, структурные схемы и варианты их технической реализации.

Цель работы. Создание преобразователей перемещений, работающих с повышенной точностью на весьма малых скоростях.

Задачей работы является разработка способов и устройств формирования и преобразования измерительных сигналов, их аппаратной реализации, и методики синтеза высокоточных средств измерения величины и скорости линейных и угловых перемещений, работающих на весьма малых скоростях.

Методы исследования: Основные результаты получены с применением теории рядов Фурье и спектрального анализа, рядов Тейлора, теории выборки, методов детерминированного и статистического анализа погрешностей измерения.

Научная новизна:

1. Получен спектр выходного сигнала фазового преобразователя перемещений с электрической амплитудной модуляцией по n фазовым каналам (ФППЭМ) для произвольной формы несущих и модулирующих сигналов. Доказано, что несущие сигналы в форме функции отсчетов не обеспечивают повышение точности измерения ФППЭМ, а в случае $n=4$ спектр выходного сигнала содержит наибольшее число высших гармоник. Разработана методика вычисления погрешностей от высших гармоник и от осреднения результатов измерения, а также методика синтеза соответствующих параметров ФППЭМ по точностному критерию.
2. Предложен способ и разработан алгоритм формирования и обработки измерительных сигналов, позволяющий при его реализации посредством перестройки структуры ФППЭМ, обеспечить существенное повышение точности измерения параметров перемещений, разработаны варианты реализации предложенного способа.
3. Получена математическая модель инструментальных погрешностей ФППЭМ с переменной структурой n -фазного канала обработки сигналов и разработана методика синтеза параметров по точностным критериям.
4. Разработано устройство и методика сравнения погрешностей при классическом способе измерения перемещений и предложенном способе с переменной структурой n -фазного канала обработки сигналов на основе данных эксперимента.

Практическая значимость: Разработан способ измерения величины и скорости перемещений и варианты его схемной реализации. Разработана инженерная методика расчета погрешностей и выбора основных параметров

ФППЭМ с переменной структурой n -фазного канала обработки сигналов. Результаты работы целесообразно использовать при разработке высокочастотных средств измерения величины и скорости угловых и линейных перемещений.

Использование результатов работы: Предложенный способ измерения реализован в виде измерительного прибора, работающего в составе системы управления линейными перемещениями делительной машины для производства нарезных дифракционных решеток на предприятии ГУП НПО ГИПО, г.Казань. Кроме того способ реализован в лабораторной установке "Синусно-косинусный вращающийся трансформатор" и изучается студентами факультета автоматики и электронного приборостроения КГТУ им. А.Н. Туполева.

Апробация работы: Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались: на I Республиканском научно-техническом семинаре молодых ученых и специалистов "Актуальные вопросы использования достижений науки и техники в народном хозяйстве", г.Казань (1989г.); на XIII Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, ЦИАМ, г. Москва, 1989г.; на конференции "Факультету автоматики и электронного приборостроения КГТУ им.А.Н.Туполева - 45 лет", г.Казань, 1996 г.; на II Республиканской научной конференции молодых ученых и специалистов, Казань 1996г.; на I Международной (III Всероссийской) конференции по электромеханотронике "Электромеханотроника - 97" Санкт-Петербург, 1997г.

Результаты диссертации легли в основу научной работы "Датчик перемещений в производстве высококачественной оптики для городской рекламы и светового оформления массовых мероприятий г.Казани", принимавшей участие в конкурсе научных работ аспирантов и студентов по проблемам городского хозяйства, проводимом администрацией г.Казани в 1996-97 гг, по результатам которого автору присуждена именная стипендия Главы администрации г. Казани.

Публикации:

По теме диссертации автором опубликовано 10 печатных работ, из них 1 статья, 6 тезисов докладов, 2 авторских свидетельства СССР и 1 патент России. По материалам работы написано 1 методическое пособие для лабораторных работ по курсу "Локальные устройства автоматики" для кафедры "Автоматика и управление" КГТУ им. А.Н. Туполева.

Положения, выносимые на защиту:

1. Формулы для определения полного гармонического состава выходного сигнала ФППЭМ и погрешностей от влияния высших гармоник несущего и модулирующего сигналов на его фазу, а также методика синтеза параметров входного преобразователя ($V_{xП}$) и ФППЭМ в целом в зависимости от гармонического состава этих сигналов, уровня случайных помех и требований быстродействия.

2. Математическое описание несущих сигналов ФПТЭМ, обеспечивающих возможность точного восстановления формы модулирующего сигнала с учетом его гармоник (до $n/2$ включительно).
3. Способ измерения и алгоритмы формирования и обработки сигналов, обеспечивающие высокоточное преобразование величины и скорости перемещений в цифровой код по дифференциальному методу с переменной структурой многофазного канала измерения перемещений раstra.
4. Методика схмотехнического и функционального проектирования ФПТЭМ с переменной структурой многофазного канала измерения перемещений раstra, методика расчета его инструментальных погрешностей и синтеза параметров из условия обеспечения заданных точностных требований.
5. Методика и результаты экспериментальной оценки и сравнительного анализа эффективности по точностным критериям двух способов измерения величины перемещений (классического и предложенного), реализованных параллельно на одних элементах.

Структура и объем диссертационной работы:

Диссертация и состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии, включающей 93 наименования и приложений, содержит 183 страницы основного текста, 15 рисунков и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении формулируется цель и задача диссертации и направления исследований, а также дана краткая характеристика работы.

Первая глава включает обзор современных методов и средств измерения параметров перемещений, в ней обозначен круг актуальных нерешенных проблем в этой области, ставится задача диссертации и раскрываются различные ее аспекты, требующие решения.

Опираясь на известные литературные источники, определены количественные границы понятия "весьма малая скорость", а также требования к соответствующим средствам измерения параметров перемещений, отраженные в таблице 1, которые предполагают рассмотрение исключительно преобразователей с цифровым выходом.

Условно структурная схема преобразования параметров перемещений в цифровой код представлена в виде трех звеньев: первичного преобразователя перемещений (ППП), основным звеном которого является входной преобразователь (ВхП); электронного устройства формирования аналоговых сигналов; устройства формирования цифровых сигналов.

Показано, что для достижения больших точности и динамического диапазона, наиболее приемлемыми являются ВхП с периодической по перемещению x функцией преобразования $q(x)$ с возможно малым периодом d , что характер-

но для ВхП на основе растров, обеспечивающих высокую точность за счет совершенства современной технологии их изготовления, а также за счет эффекта осреднения сигнала по многим периодам раstra.

Таблица 1

Точностные требования к преобразователям параметров перемещений и количественные критерии понятия "весьма малая скорость"

УГЛОВЫЕ	разреш. способн.	диапазон	частота отсч.
частота вращения	$10^{-4} \dots 10^{-6}$ рад/с	$\pm 0.01 \dots 1$ рад/с	$0.1 \dots 10$ Гц
угол поворота	$10^{-4} \dots 10^{-6}$ рад	$0 \dots \pm 2\pi$ рад	$1 \dots 100$ Гц
ЛИНЕЙНЫЕ	разреш. способн.	диапазон	частота отсч.
скорость перемещ.	$10^{-3} \dots 10^{-7}$ м/с	$\pm 0.001 \dots 0.1$ м/с	$0.1 \dots 10$ Гц
перемещение	$10^{-6} \dots 10^{-8}$ м	$0 \dots \pm 0.1$ м	$1 \dots 100$ Гц

Тем не менее, если измерять частоту вращения $5 \cdot 10^{-5}$ рад/с простейшим методом последовательного счета импульсов, образованных муаровыми полосами за плоскостью оптического кругового раstra с числом штрихов 1000 на полный круг, в течение интервала измерения скорости T_c , то при допустимой погрешности квантования 0.1% этот интервал должен составлять не менее чем $T_c = 12564$ с, что исключает измерение скорости в переходных режимах, а при требуемом быстродействии 0.1 с очевидна не только необходимость применения более чувствительного раstra, но и специальных способов формирования и обработки сигналов.

Предлагается в общем случае рассматривать модель i -го канала n -фазного растрового ВхП с функцией преобразования произвольной формы в виде суммы Фурье:

$$q_i(\theta) = \sum_{l=-L}^L q_l \exp[j(\theta + \beta_l)], \quad (1)$$

где j - комплексный множитель; q_l - комплексная амплитуда l -й гармоники функции преобразования ВхП; i - номер фазного канала; β_l - пространственный фазовый сдвиг в i -м фазовом канале многофазного растрового преобразователя. Здесь аргумент гармонической функции $q(\cdot)$

$$\theta = 2\pi x/d, \quad (2)$$

является ее пространственной фазой и мерой перемещения x .

В случаях, когда форма функции $q(\cdot)$ близка к синусоидальной (например, при использовании во ВхП дифракционных решеток) применяется упрощенная модель, учитывающая постоянную составляющую, основную и одну высшую гармонику.

Рассмотрены способы и устройства измерения параметров перемещений раstra, применимые для решения поставленной задачи, особенности сигналов

в растровых преобразователях, возникающие погрешности и методы их оценки и снижения. При рассмотрении особенностей фазовой модуляции доказана необходимость применения точной синхронизации всех периодических сигналов в фазовом преобразователе перемещений.

В устройстве рис.1, защищенном авторским свидетельством СССР №1229694 /1/, для обеспечения высокого быстродействия введено опорное перемещение кольцевого раstra 2 со скоростью $\Omega_{оп}$ за счет вспомогательного привода 3, а для целей повышения точности измерения образованы два одина-

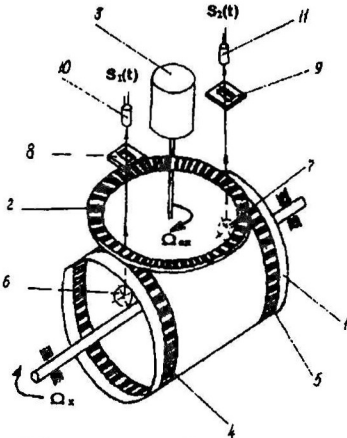


Рис. 1 Первичный преобразователь перемещений с механической модуляцией и дифференциально-фазовым выходом

ковых оптических канала с дифференциальным принципом формирования информативной составляющей сигнала: элементы 6 (осветитель), 4 (цилиндрический растр), 2 (кольцевой растр), 8 (маска), 10 (фотоприемник) составляют первый канал, а идентичные им элементы 7, 5, 2, 9, 11 -второй канал. За счет конструкции преобразователя при указанном на рисунке направлении вращения элементов 1 и 2 в первом и во втором канале частоты пульсаций ω_1 и ω_2 световых потоков, выделенных масками 8 и 9, и соответствующих им сигналов $S_1(t)$ и $S_2(t)$, будут дифференциально сдвинуты относительно опорной частоты $\omega_{оп}$ на величину ω_x , пропорциональную измеряемой частоте вращения Ω_x бара-

бана 1 с цилиндрическими растрами 4 и 5 с учетом знака (направления вращения):

$$\omega_1 = \omega_{оп} + \omega_x$$

$$\omega_2 = \omega_{оп} - \omega_x$$

Выходной величиной такого ППП при измерении частоты вращения является разность частот сигналов $S_1(t)$ и $S_2(t)$

$$\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 = 2\omega_x, \quad (3)$$

пропорциональная удвоенному значению скорости Ω_x измеряемых перемещений и не зависящая от опорной частоты $\Omega_{оп}$, кроме того, при вычитании частот ω_1 и ω_2 компенсируются и ряд других погрешностей.

Данный ППП обладает аналогичными свойствами и при измерении угловых перемещений - разность фаз $\Delta\phi$ сигналов $S_1(t)$ и $S_2(t)$ пропорциональна удвоенному углу поворота χ барабана 1:

$$\Delta\phi = 2\theta = 2\pi \cdot 2\pi / d, \quad (4)$$

где d - угловой период цилиндрических растров 4 и 5, рад.

Макет данного устройства [2] позволил зарегистрировать частоту вращения $\Omega_x = 10^5$ рад/с за время $T_c = 0.1$ с.

В книге "Высокоточные преобразователи угловых перемещений" / Э.Н. Асиновский, А.А. Ахметжанов, М.А. Габидуллин и др.; под общ.ред. А.А. Ахметжанова. - М.: Энергоатомиздат, 1986, рассмотрены преобразователи угловых перемещений на основе синусно-косинусного вращающегося трансформатора с введением несущей электрическим а не механическим, как в а.с. №1229694, путем с перестраиваемой структурой в процессе формирования пары измерительных сигналов, обладающих свойствами, аналогичными сигналам $S_1(t)$ и $S_2(t)$ рассмотренного преобразователя. Такой преобразователь с переменной структурой за счет формирования сигналов $S_1(t)$ и $S_2(t)$ в одном физическом канале на одних и тех же элементах последовательно во времени обеспечивает при их обработке компенсацию многих погрешностей, прежде всего - аддитивных медленно меняющихся.

Однако недостатки такого преобразователя, скудная теоретическая база для его разработки и ограничение случаев $n=4$ требуют проведения исследований как по разработке новых способов и устройств, основанных на преобразовании перемещений раstra с переменной структурой многофазного канала обработки сигналов, так и по разработке основ их синтеза по точностным критериям.

Во второй главе проводится развитие упомянутых в известной литературе положений, касающихся разработки высокоточных преобразователей параметров перемещений раstra, а также оцениваются граничные возможности известных способов и устройств для целей измерения перемещений при малых скоростях, дается обоснование требований к ним.

Проанализированы соотношения, связывающие перемещение, скорость и погрешности, обусловленные особенностями работы фазовых преобразователей перемещений с последующим квантованием интервалов времени тактовых импульсами высокой частоты. Выведены необходимые соотношения и выработаны требования к суммарной погрешности преобразования и шагу квантования перемещения из условия обеспечения допустимой погрешности измерения скорости при заданных пределах ускорений, а также к времени измерения скорости T_c и перемещения T_n при заданном среднем значении ускорения и допустимой динамической погрешности по перемещению.

Разработана методика выбора несущей частоты ФПТЭМ и числа отсчетов m_1 фазы сигнала переменного тока, которое бы обеспечило требуемый уровень сглаживания флуктуационных аддитивных помех, имеющихся в этом сигнале. При условии, что помеха есть случайный центрированный стационарный эргодический процесс с нормальным распределением, причем его период корреля-

ции много меньше периода полезного сигнала, число отсчетов фазового интервала m_1 должно выбираться из условия $m_1 \geq (k_{\text{фл}}/2\pi)^2$, в том случае, если выражение в правой части принимает значение не менее тридцати. Здесь $k_{\text{фл}}$ - требуемый коэффициент снижения флуктуационных погрешностей. Если же m_1 оказалось меньшим тридцати, то применяется методика расчета, основанная на квантильных оценках распределений Стьюдента, по которой сформирована табличная зависимость m_1 от $k_{\text{фл}}$ для распространенных на практике 90-процентной и 95-процентной квантилей. Сделан вывод, что минимальный эффект сглаживания флуктуационных погрешностей может быть достигнут лишь при числе отсчетов фазы m_1 не менее четырех.

Получены выражения для полного спектра выходного сигнала ФППЭМ с произвольным числом фазовых каналов с учетом спектров амплитуд и фаз несущих и модулирующих сигналов, развивающие аналогичное исследование Л.Н. Преснухина. Периодические сигналы произвольной формы представлены в виде комплексных сумм Фурье. Выполнен анализ спектров при различном гармоническом составе несущих и модулирующих сигналов.

На основе анализа спектрального состава выходного сигнала многофазного ФППЭМ получены уравнения погрешностей от высших гармоник как для перемещения, так и для скорости и разработана методика синтеза его важнейших параметров: числа n фазовых каналов ФППЭМ, требуемого коэффициента подавления высших гармоник несущего сигнала электронным фильтром и его добротности. Предложен алгоритм формирования интервала времени измерения скорости, обеспечивающий за некоторое число циклов измерения, снижение погрешности от несинусоидальности несущих и модулирующих сигналов до заданного уровня.

Проанализирована возможность восстановления формы $q(\cdot)$ и фазы θ функции преобразования перемещений $V_{\text{хП}}$ в ФППЭМ с применением теории выборки. При этом сигналы n одинаковых входных преобразователей, образующих симметричную n -фазную систему, рассматриваются как совокупность выборочных значений функции $q(\cdot)$. Впервые такая идея высказана В.А.Соломатинным и В.А.Шилиным, но не получила развития в виде описания сигналов и их технической реализации.

Действительно, согласно теореме Котельникова можно утверждать, что при условии ограничения $q(\cdot)$ по спектру гармоникой с номером $n/2$, она может быть в точности восстановлена, если из n сигналов $q_i(\theta) = q(\theta + \beta_i)$ входных преобразователей образовать новый $S(\cdot)$ в соответствии с соотношением:

$$S(z + \theta) = \sum_{i=1}^n q(\theta + \beta_i) \cdot p(z + \alpha_i), \quad (5)$$

где z - дополнительная независимая переменная, имеющая размерность угла, рад; $\alpha_i = \beta_i = (i-1) \cdot 2\pi/n$ - дополнительный сдвиг по аргументу в i -м фазовом канале; $p(z + \alpha_i)$ - периодическая по z функция с периодом 2π . Получены выра-

жения для $p(\cdot)$ и предложены различные способы ее реализации, а также способы реализации соотношения (5): вычислительным путем (z - машинная, виртуальная переменная), и путем переноса во временную область в ФППЭМ, когда $z = \omega_0 t$. Однако, как показано в работе, в любом случае, высокая цена создания трудно реализуемых несущих сигналов $p(\cdot)$ полученного вида, обеспечивая приближение $S(\cdot)$ по форме к $q(\cdot)$, не служит главной цели - снижению фазовых погрешностей преобразования параметров перемещений и наилучшими с точки зрения минимальных погрешностей фазы и частоты сигнала являются синусоидальные несущие и модулирующие сигналы.

По результатам исследований, выполненным во второй главе, сделан основной вывод о возможности одновременного высокоточного измерения перемещения и скорости перемещений раstra с помощью ФППЭМ при условии выполнения определенных требований, однако для случая весьма малых скоростей необходима проработка вопросов построения ФППЭМ с переменной структурой, реализующего дифференциальный метод измерения параметров перемещений.

Третья глава посвящена разработке преобразователя перемещений раstra с переменной структурой многофазного канала обработки сигналов, в котором реализован дифференциальный метод формирования сигналов.

Предложенный способ измерения /6/, защищенный патентом России N 2039987, состоит в следующем.

Из n -фазной системы периодических по времени несущих сигналов $p_i(\omega_0 t) = p(\omega_0 t + 2\pi(i-1)/n)$ и n -фазной системы периодических по перемещению модулирующих сигналов $q_i(\theta) = q(\theta + 2\pi(i-1)/n)$ формируют последовательно два сигнала $S_1(t)$ и $S_2(t)$ - сигнал прямой фазы и сигнал обратной фазы соответственно, по соотношениям:

$$S_1(t) = \sum_{i=1}^n q_i \cdot p_i, \quad (6)$$

и

$$\begin{aligned} S_2(t) &= q_1 p_1 + q_2 p_{n-1} + q_3 p_{n-2} + \dots + q_{n-2} p_3 + q_{n-1} p_2 = \\ &= q_1 \cdot p_1 + \sum_{i=2}^n q_i \cdot p_{n-i+1} \end{aligned} \quad (7)$$

или

$$\begin{aligned} S_2(t) &= q_1 p_1 + q_{n-1} p_2 + q_{n-2} p_3 + \dots + q_3 p_{n-2} + q_2 p_{n-1} = \\ &= q_1 \cdot p_1 + \sum_{i=2}^n q_{n-i+1} \cdot p_i \end{aligned} \quad (8)$$

В этом случае периодические сигналы $S_1(t)$ и $S_2(t)$ будут иметь вид

$$\begin{aligned} S_1(t) &= S(\omega_0 t + \theta + 2\pi \eta_\phi) \\ S_2(t) &= S(\omega_0 t - \theta + 2\pi \eta'_\phi) \end{aligned}$$

где η_ϕ и η'_ϕ - фазовые погрешности сигналов прямой и обратной фазы соответственно.

Показано, что сформированные таким образом сигналы $S_1(t)$ и $S_2(t)$ будут по своему характеру и свойствам аналогичны выходным сигналам ППП с механической модуляцией, выполненному по рис.1, то есть разность их фаз пропорциональна удвоенному измеряемому перемещению, в соответствии с (4), а разность частот пропорциональна удвоенной скорости, в соответствии с (3). При этом значительная часть погрешностей, входящих в η_ϕ и η'_ϕ , практически не изменяют свою величину и знак в течение цикла изменения структуры и обработки сигналов, за счет чего после обработки оказываются скомпенсированными.

При четных n , для симметричных относительно оси абсцисс функций $p(\cdot)$ и $q(\cdot)$ (функций, не имеющих четных гармоник в спектре), можно использовать не полные множества сигналов $p(\cdot)$ и $q(\cdot)$, а усеченные по количеству вдвое, с номерами от 1 до $n/2$, и формировать сигналы $S_1(t)$ и $S_2(t)$ в соответствии с соотношениями

$$S_1(t) = 2 \sum_{i=1}^{n/2} q_i \cdot p_i \quad (9)$$

и

$$S_2(t) = 2q_1 \cdot p_1 - 2 \sum_{i=2}^{n/2} q_{n/2-i+1} \cdot p_i \quad (10)$$

или

$$S_2(t) = 2q_1 \cdot p_1 - 2 \sum_{i=2}^{n/2} q_i \cdot p_{n/2-i+1} \quad (11)$$

В частном случае для четырехфазного ФППЭМ, работающего по данному способу, эти выражения примут вид:

$$S_1(t) = 2(p_1 q_1 + p_2 q_2) = 2[p(\omega_0 t) \cdot q(\theta) + p(\omega_0 t + \pi/2) \cdot q(\theta + \pi/2)] \quad (12)$$

$$S_2(t) = 2(p_1 q_1 - p_2 q_2) = 2[p(\omega_0 t) \cdot q(\theta) - p(\omega_0 t + \pi/2) \cdot q(\theta + \pi/2)] \quad (13)$$

Способ измерения, по которому формируют только один сигнал $S_1(t)$ в соответствии с (6) или (9) и соответствующие ему ФППЭМ, известны, широко применяется и в работе названы классическими.

На рис.2 представлены разработанные в диссертации схемы устройств измерения параметров перемещений, реализующие предложенный способ, учитывающие весь богатый спектр известных схемных решений классических ФППЭМ.

В схемах рис.2, а), д) функцию перемножения сигналов $q(\cdot)$ и $p(\cdot)$ выполняет непосредственно ППП, поэтому они не содержат специальных перемножителей.

Генератор несущей 2 в схемах рис.2, в), г), д) выполнен многофазным, а в схемах рис.2, а), б) дополнительно применены фазосдвигающие устройства 7, выполняющие необходимый сдвиг фаз α , уже промодулированных сигналов.

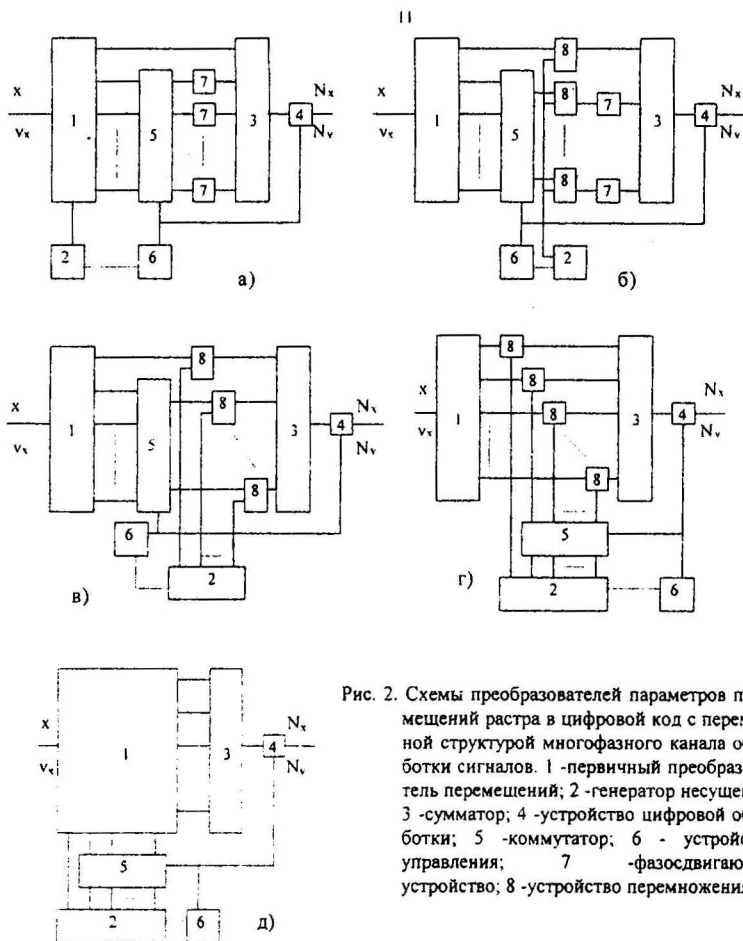


Рис. 2. Схемы преобразователей параметров перемещений раstra в цифровой код с переменной структурой многофазного канала обработки сигналов. 1 - первичный преобразователь перемещений; 2 - генератор несущей; 3 - сумматор; 4 - устройство цифровой обработки; 5 - коммутатор; 6 - устройство управления; 7 - фазосдвигающее устройство; 8 - устройство перемножения.

Введенный в классический ФППЭМ коммутатор 5 осуществляет подачу входных сигналов на выход либо в прямом порядке (при нулевом логическом сигнале на выходе устройства управления 6) либо в обратном порядке (при сигнале логическая единица). Этим осуществляется изменение структуры преобразователя во всех случаях согласно (6) - (8).

Устройство управления 6 вырабатывает импульсы со скважностью 0.5 и осуществляет управление переключением коммутатора 5 и управление согла-

сованной обработкой сигналов прямой фазы и обратной фазы в устройстве цифровой обработки 4.

Устройство цифровой обработки 4 фиксирует фазовые и частотные параметры сигнала прямой фазы $S_1(t)$, затем, после переключения структуры коммутатором 5 - фазовые и частотные параметры сигнала обратной фазы $S_2(t)$, после чего формирует коды разности их частот N_v и коды разности их фаз N_α .

Реализация зависимостей (9)-(11) также может быть выполнена по схемам рис.2 с той разницей, что коммутатор 5 должен помимо изменения порядка следования входных сигналов выполнять функцию переключения их знака. Для четного числа фазовых каналов не менее $n=6$ в диссертации разработаны оригинальные варианты схемной реализации предложенного способа, а в случае $n=4$ схемная реализация синусно-косинусного преобразователя наиболее проста, поскольку выражения (12) и (13) отличаются лишь знаком одной из компонент сигнала ФППЭМ, рис.3.

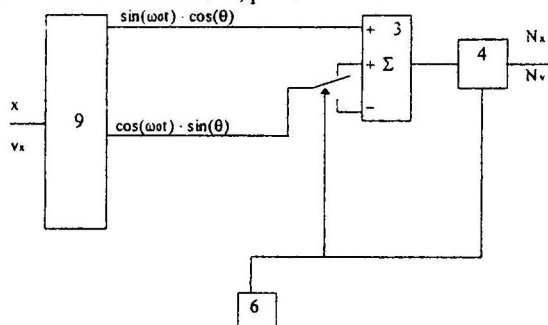


Рис.3. Синусно-косинусный преобразователь параметров перемещений в цифровой код с переменной структурой. 9 -формирователь компонент сигнала прямой фазы и обратной фазы; 3 -сумматор-вычитатель; 4 -устройство цифровой обработки; 6 - устройство управления.

Здесь блок 9, условно названный формирователем компонент сигнала прямой фазы и обратной фазы, включает соответствующие блоки схем рис.2, которые формируют попарные произведения временных и пространственных сигналов.

Разработаны варианты функциональной реализации предложенных схем и методика функционального проектирования ФППЭМ с переменной структурой многофазного канала обработки сигналов. Основой для создания методики является схема, изображенная на рис.4, включающая классификацию функционального исполнения основных операций в ФППЭМ (верхняя часть) и перечень схемных решений по рис. 2, на которых возможна реализация выбранной

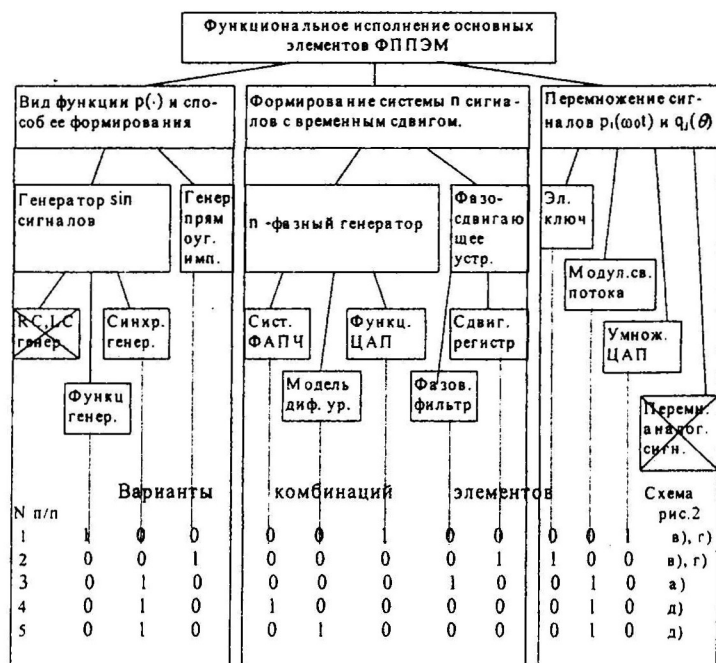


Рис. 4 Функциональное проектирование ФППЭМ

комбинации функциональных блоков (нижняя часть). Выполнен анализ всех приемлемых комбинаций, дано обоснование наиболее удачных среди них.

Разработан метод и схемы предварительной аналоговой обработки сигналов в ФППЭМ, заключающейся в выделении из компоненты $U_{ij}=p_i(\omega_0t) \cdot q_i(\theta)$, переменных составляющих, образующих полезный сигнал и в коррекции их параметров путем подстройки.

Получены формулы вычисления инструментальных погрешностей ФППЭМ, работающего по предложенному способу с учетом погрешностей предварительной обработки сигналов, разработана методика синтеза преобразователя по критерию непревышения заданных значений погрешностей. Получена линеаризованная модель инструментальных погрешностей, обеспечивающая точность подсчета не хуже 16.3% в наименее благоприятном случае.

Показано, что для четырехфазного ФППЭМ линейная составляющая погрешности от расфазировки несущих сигналов $p_i(\omega_0t)$ равна нулю, что позволяет существенно, в десятки раз, снизить требования на допусковое отклонение

этого параметра, а отклонения амплитудных значений функций $p(\cdot)$ и $q(\cdot)$ от средней амплитуды ослабляются в приведенной выходной погрешности более чем на порядок для любых n .

Выполнен сравнительный анализ погрешностей по классическому способу преобразования перемещений в n -фазном ФППЭМ с постоянной структурой и по предложенному способу, реализованному в аналогичном ФППЭМ с переменной структурой. Показано, что многие погрешности ФППЭМ, работающего по предложенному способу имеют существенно меньшие значения, чем для классического ФППЭМ, а влияние аддитивной фазовой помехи компенсируется полностью.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования повышения точности измерения параметров перемещений в ФППЭМ с переменной структурой на примере синусно-косинусного преобразователя, доказывающие на частном примере полученные в диссертации теоретические положения.

Преобразователь позволяет реализовать как классический, так и предложенный способ на одних и тех же функциональных блоках, по окончании каждого цикла фиксируются оба результата измерения.

Эксперимент проводился в статическом режиме с измерением величины перемещений, поскольку оценки погрешности измерения скорости отсюда могут быть легко получены расчетным путем.

Исследуемый преобразователь перемещения в код имеет синусно-косинусный ВхП на линейных дифракционных решетках с шагом 4 мкм и электронное устройство формирования и обработки сигналов.

Для выделения погрешностей, связанных с обработкой сигналов в электронном тракте, помимо натурального проведен имитационный эксперимент, в котором ВхП заменен более точным электронным имитатором его сигналов.

Перемещения в экспериментах, проводимых с имитатором сигналов входного преобразователя задавались по семнадцати точкам с равномерным шагом, а в натуральных экспериментах - по семи, с шагом по линейному перемещению 0.6328 мкм. Объем выборки по каждой точке составил шестьдесят пять значений. Контроль перемещений в натурном эксперименте осуществлялся по лазерному интерферометру, построенному на базе ЛГ - 207.

На рис.5 представлены результаты статистической обработки экспериментальных данных в виде осредненных кривых зависимости погрешностей от задаваемого перемещения с соответствующими доверительными ($P_d=0.9$) интервалами этих погрешностей.

Кривые погрешностей, изображенных на рис.5, а) подтверждают на частном примере адекватность полученной модели инструментальных погрешностей.



Рис.5 Погрешности преобразователя линейных перемещений по данным экспериментов

Данные о погрешностях при натурных испытаниях рис.5, б) указывают на явное снижение погрешностей преобразователя при измерении по предложенному способу.

Данные имитационного эксперимента, проведенного при настроенных на номинал параметрах ФППЭМ, рис.5, в), позволяют сделать вывод о многократном снижении систематических погрешностей и существенном снижении случайных погрешностей, возникающих на этапе обработки сигналов в электронном тракте. По полученным из всей совокупности результатов измерений интегральным характеристикам погрешностей снижение их систематической составляющей при переходе с классического способа измерения на предложенный способ составило с 1.43% до -0.026%, а снижение случайной составляющей ($P_d=0.9$) с 0.38% до 0.12% от величины шага растра, равного 4 мкм. Характерной особенностью результатов всех экспериментов является наиболее существенное снижение систематических, медленно меняющихся погрешностей.

Характер полученных в диссертации оценок кривых распределения погрешностей близок к нормальному.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Обоснован выбор типа ВхП и принципов формирования сигналов преобразователя параметров перемещений в цифровой код.
2. Получен спектр выходного сигнала n -фазного ФППЭМ при произвольных периодических несущих и модулирующих сигналах. Определены несущие сигналы, обеспечивающие восстановление формы модулирующих сигналов с ограниченным спектром, точность измерения перемещений при этом не повышается.
3. Разработана методика расчета основных параметров ФППЭМ, удовлетворяющих требованиям точности и быстродействия.
4. Предложен способ и разработан алгоритм формирования и обработки сигналов в n -фазном ФППЭМ с переменной структурой, обеспечивающий существенное повышение точности измерения параметров перемещений, разработаны варианты его реализации.
5. Получена математическая модель инструментальных погрешностей ФППЭМ с переменной структурой n -фазного канала обработки сигналов и разработана методика синтеза его параметров по точностным критериям. Сделан общий вывод: наилучшие результаты снижения погрешностей измерения параметров перемещений достигаются в четырехфазном ФППЭМ с переменной структурой канала обработки сигналов при условии, что характеристика преобразования ВхП и несущие сигналы имеют синусоидальную форму, что достигается применением во ВхП дифракционных решеток и высокочастотного полосового фильтра в электронном тракте. В случае большого содержания высших гармоник в этих сигналах вариант четырехфазного ФППЭМ яв-

ляется наименее приемлемым не зависимо от способа дальнейшей обработки сигналов.

6. Разработан четырехфазный преобразователь параметров перемещений в цифровой код с переменной структурой канала обработки сигналов. Преобразователь используется в составе системы управления линейными перемещениями делительной машины для производства высокоточных оптических деталей, благодаря чему существенно повышено качество производимой продукции.
7. Разработана экспериментальная установка и методика сравнительного анализа погрешностей ФППЭМ. Подтверждены результаты теоретических положений, разработанных в диссертации, в том числе, модели погрешностей. По данным экспериментов снижение их систематической составляющей при переходе с классического способа измерения на предложенный составило с 1.43% до -0.026%, а снижение случайной составляющей ($P_d=0.9$) с 0.38% до 0.12% от величины шага раstra, равного 4 мкм.

Публикации по теме диссертации:

1.А. с. №1229694 СССР, Измеритель скорости вращения вала./ Маханько А.В., Щеглов М.Ю. Бюллетень изобретений N 17, 1986

2.Маханько А.В., Щеглов М.Ю. Измеритель малых частот вращения вала./ Теория и проектирование систем автоматического управления и их элементов: Сб. ст. -Уфа: УАИ, 1986. - С. 91-95.

3.А. с. №1485130 СССР, Измерительный преобразователь параметров угловых перемещений. / Маханько А.В., Щеглов М.Ю. Бюллетень изобретений N 21, 1989.

4.Щеглов М.Ю. Оценка погрешности фазовых измерительных преобразователей величины и скорости механических перемещений. XIII Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов. Тезисы докладов.-Москва: ЦИАМ, 1989г. С.56-58.

5.Щеглов М.Ю. Точное восстановление функции преобразования многофазного пространственного модулятора в датчиках перемещений накапливающего типа./ Актуальные вопросы использования достижений науки и техники в народном хозяйстве: Тез. докл. на I Республ. науч.-техн. сем. мол. уч. и спец. - Казань: КАИ, 1989. - С. 15.

6.Щеглов М.Ю., Лукашевич Я.К., Абдрахманов Р.Х. Способ измерения величины и скорости перемещения. Патент РФ N 2039987, БИ N 2, 1995.

7. Щеглов М.Ю. Выбор вариантов реализации элементов преобразователя перемещений фазового типа с электрической модуляцией// Факульте-

ту автоматики и электронного приборостроения КГТУ им. А.Н.Туполева - 45 лет. В 2-х кн.: Тез. докл. науч.-мет. конф. (Казань, февр 1996 г.). - Казань, КГТУ им. А.Н.Туполева, 1996. - Кн. 1. С. 65.

8. Щеглов М.Ю. Программно-аппаратный комплекс для экспериментального определения метрологических параметров преобразователей перемещений с синусно-косинусным первичным преобразователем. // II Республиканская научная конференция молодых ученых и специалистов. В 5-и кн.: Тез. докл. конф. (Казань, июнь 1996г.). - Казань, 1996. - Кн. 5 "Техника и технология", С. 44.

9. Щеглов М.Ю., Ахмеров М.А. Алгоритм экспериментальных исследований и обработки результатов имитационных испытаний узлов преобразователя перемещений. // II Республиканская научная конференция молодых ученых и специалистов. В 5-и кн.: Тез. докл. конф. (Казань, июнь 1996г.). - Казань, 1996. - Кн. 5 "Техника и технология", С. 54.

10. Щеглов М.Ю. Оценка инструментальных погрешностей дифференциального фазового преобразователя величины и скорости перемещений. // Электромеханотроника - 97 : Тез. докл. междунар. науч. конф. (Санкт-Петербург, май 1997г.). - Санкт-Петербург, май 1997. - С. 131.

Формат 60x84 1/16.	Бумага газетная.	Печать офсетная.
Печ. л. 1.25.	Усл. печ. л. 1.16.	Усл. кор.-отт 1.16.
Тираж 100.	Уч. -изд.л. 1.0.	Заказ А 80.

Издательство Казанского государственного технического
университета

Типография Издательства Казанского государственного технического
университета
420111, Казань, К. Маркса, 10

2-00